



В.Б. Кунтыш, д-р техн. наук, А.Б. Сухоцкий, канд. техн. наук
(Белорусский государственный технологический университет, г. Минск);
А.В. Самородов, канд. техн. наук (Северный (Арктический) федеральный университет
им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия). E-mail: alk2905@mail.ru

Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) — составная часть оборудования теплотехнологических процессов в нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической, газовой отраслях промышленности. АВО также применяются на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (АГНКС), в тепло- и электроэнергетике, в холодильной технике, на атомных станциях. В АВО происходит снижение температуры рабочих сред внутри оребренных труб теплообменных секций за счет отвода избыточной теплоты потоком охлаждающего наружного воздуха. Парк АВО непрерывно увеличивается в связи с увеличением добычи газа и расширением строительства АГНКС для газификации транспорта [1, 2]. Поэтому энергосбережение — одна из основных проблем хозяйства РФ и других стран СНГ.

Одним из технических решений энергосбережения при эксплуатации АВО является перевод их работы в течение некоторого периода года в безвентиляторный режим (отключение всех или части вентиляторов). Отвод теплоты от рабочего тела (продукта, энергоносителя, теплоносителя) осуществляется свободной конвекцией охлаждающего воздуха при понижении его температуры до некоторого значения. Исследования [3–5] перевода аппаратов на отвод теплового потока естественной конвекцией воз-

духа подтвердили энергетическую и экономическую целесообразность такого решения — электропотребление уменьшилось в среднем на 37 % в год. Температуру наружного воздуха подбирали опытным способом в каждом конкретном случае, поскольку прогнозировать ее невозможно ввиду отсутствия метода теплового расчета АВО в режиме свободной теплоотдачи. Для разработки программы автоматического регулирования АВО с учетом энергосберегающего режима отвода теплоты необходим метод теплового расчета АВО при отводе теплоты от рабочего тела свободной теплоотдачей воздуха.

Надежность метода обеспечивается применением индивидуальных уравнений подобия для расчета свободно-конвективной теплоотдачи воздуха для каждого типоразмера биметаллической ребристой трубы (БРТ) стандартизированных АВО, конкретных компоновочных параметров пучка из БРТ в теплообменных секциях и значений коэффициента теплоотдачи излучением в пучке оребренных труб с учетом особенностей излучательных свойств поверхности оребрения из алюминия, подвергшегося механическому воздействию при экструдировании (способ ВНИИметмаша). В связи с этим разработана методика [6] экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции воздуха шахматных пучков из БРТ АВО и

выполнены исследования [6–8] для получения частных уравнений подобия, в которых учитываются геометрические размеры труб и ребер, компоновочные параметры пучка, а также конструктивные отличия соединения теплообменных секций (пучков) с диффузором или конфузором. Разработан метод [9] расчета теплового потока излучением от пучка оребренных труб и способ [10] определения степени черноты алюминиевой поверхности оребрения БРТ [11]. Достоверность и точность значений рассчитываемых параметров, например температуры наружного воздуха, подтверждается опытными данными, большинство которых получено впервые.

При расчете АВО в режиме свободной конвекции (при полностью отключенном приводе вентиляторов) известными являются: параметры охлаждаемого теплоносителя (температура на входе t'_1 и выходе t''_1 аппарата °С); массовый расход теплоносителя G_1 , кг/с; теплофизические свойства теплоносителя; геометрические параметры оребренных труб (наружный d_n и внутренний d_i диаметры несущей трубы; диаметр трубы у основания d_0 и на торцах оребрения d ; высота $h = 0,5(d - d_0)$, шаг s и средняя толщина ребра Δ , м; коэффициент оребрения трубы $\varphi = 1 + \frac{2h}{s d_0}(d_0 + h + \Delta)$; компоновочные характеристики пучков теплообменных секций

и конструктивных узлов аппарата (расположение труб в решетках пучка — преимущественно шахматное; поперечный S_1 и продольный S_2 шаг труб в пучке, m ; число поперечных рядов труб z).

Искомая величина — температура наружного воздуха t_0 , при которой обеспечивается охлаждение продукта до конечной температуры t_1'' .

Основой решения задачи является уравнение теплопередачи аппарата

$$Q = k F \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

где Q — тепловой поток, Вт; k — коэффициент теплопередачи, Вт/($m^2 \cdot K$); F — площадь поверхности оребрения, m^2 ; Δt_{cp} — средний температурный напор между теплоносителем и воздухом, $^{\circ}C$.

Метод теплового расчета АВО

1. Для аппаратов, работающих без изменения агрегатного (фазового) состояния теплоносителя, тепловой поток, Вт, рассчитывается по формуле

$$Q = G_1 c_1 (t_1' - t_1''), \quad (2)$$

где c_1 — удельная средняя массовая изобарная теплоемкость охлаждаемого теплоносителя, кДж/(кг·К).

В случае изменения агрегатного состояния охлаждаемого теплоносителя можно воспользоваться формулой

$$Q = G_1 (h_1' - h_1''), \quad (3)$$

где h_1' , h_1'' — энтальпия охлаждаемого теплоносителя соответственно на входе и выходе, Дж/кг.

2. Задается температура наружного воздуха t_0 .

3. Вычисляется средняя температура, $^{\circ}C$, охлаждаемого теплоносителя как среднеарифметическая:

$$t_1 = 0,5(t_1' + t_1'').$$

В расчетах высокой точности эту температуру вычисляют как среднеинтегральную по поверхности теплообмена:

$$t_1 = t_0 + (t_1' - t_1'') / \ln[(t_1' - t_0) / (t_1'' - t_0)].$$

4. Коэффициент теплоотдачи от оребренной поверхности к наружному воздуху включает теплоотдачу конвекцией α_k и излучением α_l , Вт/($m^2 \cdot K$):

$$\alpha_2 = \alpha_k + \alpha_l.$$

5. Средний приведенный коэффициент свободно-конвективной теплоотдачи, Вт/($m^2 \cdot K$), вычисляется по формуле

$$\alpha_k = (Nu \lambda) / d_0, \quad (4)$$

где Nu — число Нуссельта для воздуха; λ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/($m \cdot K$).

6. Принимается предварительно температура поверхности БРТ у основания ребер, равная средней температуре охлаждаемого теплоносителя $t_{ст} = t_1$.

7. Вычисляется средний температурный напор, $^{\circ}C$:

$$\Delta t_{cp} = t_1 - t_0.$$

8. Вычисляется число Релея

$$Ra = g \beta (t_{ст} - t_0) d_0^3 / (\nu a),$$

где $\beta = 1/(t_0 + 273)$ — коэффициент температурного расширения воздуха, $^{\circ}C^{-1}$; ν , a — коэффициенты кинематической вязкости, m^2/c , и температуропроводности воздуха, m^2/c , соответственно; $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, m/c^2 .

Теплофизические свойства воздуха ν , a следует принимать при той же температуре, что и в числах подобия критерияльного уравнения вида $Nu = f(Ra)$, принятого для расчета коэффициента теплоотдачи α_k .

9. По [6–8] выбирается индивидуальное уравнение подобия для расчета параметров пучка АВО, переводимого в энергосберегающий режим эксплуатации, и вычисляется число Nu . Уравнение подобия

$$Nu = A Ra^n (1 - \exp(-B / Ra)),$$

где A , B , n — экспериментальные коэффициенты.

С использованием вычисленного значения Nu определяется по (4) средний коэффициент теплоотдачи пучка конвекцией.

Для наклонных пучков значение числа Nu , вычисленное для горизонтального пучка труб, следует умножить на поправочный коэффициент:

$$C_\gamma = (1 + 0,00053\gamma + 0,00013\gamma^2) - 1,$$

где γ — угол наклона горизонтальной оси БРТ к горизонтальной плоскости.

γ	15°	30°	45°	60°
C_γ	0,98	0,88	0,77	0,67

Большинство экспериментов проведено на пучках из БРТ с $\phi = 16,8$. В случае применения БРТ с $\phi \approx 20...21$ необходимо значение Nu умножить на усредненный поправочный коэффициент $C_\phi = 0,68$. Погрешность расчета α_k не превышает $\pm 10\%$.

При расчете отводимого теплового потока свободной конвекцией существенный вклад в теплоотдачу от оребренной поверхности может вносить излучение (20...50%). Этот вклад тем больше, чем меньше число рядов труб в пучке.

10. Определяется коэффициент теплоотдачи излучением по формуле

$$\alpha_l = \frac{Q_l}{F(t_{ст} - t_0)} = \frac{c_0 \epsilon_{пр} \Phi_{т-о} \Phi_{г-о}}{(t_{ст} - t_0)} \times \left[\left(\frac{273 + t_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_0}{100} \right)^4 \right],$$

где $c_0 = 5,67$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/($m^2 \cdot K^4$); $\epsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты системы тел *пучок — среда*; $\Phi_{т-о}$ — средний угловой коэффициент излучения одиночной круглоребристой трубы к окружающей среде; $\Phi_{г-о}$ — средний угловой коэффициент излучения пучка из гладких труб диаметром d к окружающей среде.

Справедливость произведения $\Phi_{т-о} \Phi_{г-о}$ подтверждается опытными исследованиями, выполненными методом светового моделирования для пучков АВО из оребренных труб с $s/d_0 = 0,1$. Для расчета среднего углового коэффициента излучения одиночной круглоребристой трубы к окружающей среде с учетом толщины ребра применяется формула [9]



$$\varphi_{\Gamma-o} = \frac{(s - \varphi_{o1-o1}(s - \Delta))d}{(d^2 - d_0^2)/2 + (s - \Delta)d_0 + \Delta d},$$

где φ_{o1-o1} — угловой коэффициент излучения на себя цилиндрической поверхности диаметром d и длиной $(s - \Delta)$, замыкающей межреберную полость.

Для труб АВО может быть принято $\varphi_{o1-o1} = 0,02...0,04$ или рассчитано по формуле [12]

$$\varphi_{o1-o1} = 1 - R + \frac{H}{4} + \frac{2R}{\pi} \arctg \left(\frac{2\sqrt{1-R^2}}{H} \right) + \frac{H}{2\pi} \arcsin(1 - 2R^2) - \frac{\sqrt{H^2 + 4}}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(1 - \frac{2R^2 H^2}{H^2 - 4R^2 + 4} \right) \right],$$

где $R = d_0/d$; $H = 2(s - \Delta)/d$.

Средний угловой коэффициент излучения от гладкотрубного пучка к окружающей среде вычисляется по данным [12]:

$$\varphi_{\Gamma-o} = \frac{2\sigma_1}{\pi z} \left[1 - \left(\sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1^2}} - \frac{1}{\sigma_1} \arctg \sqrt{\varphi_1^2 - 1} \right)^z \right],$$

где $\sigma_1 = S_1 / d$ — относительный поперечный шаг.

Приведенную степень черноты вычисляют по формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{эф}}} - 1 \right) \varphi_{\Gamma-o} \right]^{-1},$$

где $\varepsilon_{\text{эф}}$ — эффективная степень черноты одиночной оребренной трубы.

В первом приближении

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_{\Gamma}} - 1 \right) \varphi_{\Gamma-o} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где ε_{Γ} — степень черноты оребренной поверхности труб (для окисленного алюминия $\varepsilon_{\Gamma} = 0,2...0,3$).

Анализ показал, что расчет $\varepsilon_{\text{эф}}$ по (5) для труб (с тесно расположенными алюминиевыми ребрами), применяемых в современных АВО, дает завышенный до 30 % результат по сравнению с другими, более точными методами. Только при $\varepsilon_{\Gamma} \geq 0,5$ ошибка не более 10 %.

Погрешность вычисления $\varepsilon_{\text{эф}}$ обуславливается не только методом расчета, но также и ошибкой определения значения ε_{Γ} (принимается по справочным данным без учета действительных излучательных свойств поверхности БРТ).

В исследованиях [11] свободной конвекции в пучках из оребренных труб были получены уточненные данные: при $\varphi = 16,8$ $\varepsilon_{\text{эф}} = 0,6$; при $\varphi = 21,0$ $\varepsilon_{\text{эф}} = 0,65$ с отклонением до ± 5 % в зависимости от температуры стенки, $t_{\text{ст}} = 40...210$ °С. В этом интервале температуры $t_{\text{ст}}$ была определена [10] степень черноты окисленной поверхности оребрения БРТ, аппроксимированная формулой

$$\varepsilon_{\Gamma} = (175,7 - 0,17t_{\text{ст}}) \cdot 10^{-3}.$$

Изложенный упрощенный способ расчета лучистого коэффици-

ента теплоотдачи с использованием приведенной степени черноты $\varepsilon_{\text{пр}}$ и среднего углового коэффициента от пучка к среде $\varphi_{\Gamma-o}$ можно применять в случаях, когда для одиночной оребренной трубы $\varepsilon_{\text{эф}} > 0,85$. В противном случае значение лучистого коэффициента теплоотдачи получается завышенным на 20...50 %.

Наиболее общим является уточненный способ расчета [9] с выделением в пучке двух зон: зона 1 — наружные половины труб крайних поперечных рядов, зона 2 — остальная часть пучка. Зоной 3 считается окружающая среда, состоящая из двух плоскостей, ограничивающих пучок. Математическим моделированием была получена основная формула расчета зональным методом коэффициента теплоотдачи излучением применительно к пучку оребренных труб:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{c_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{\Gamma-o}}{(t_{\text{ст}2} - t_0)} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z - 1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{ст}2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_0}{100} \right)^4 \right],$$

где Φ_{1-3} , Φ_{2-3} — разрешающий угловой коэффициент излучения от первой зоны к третьей и от второй зоны к третьей, соответственно:

$$\Phi_{1-3} = [\varphi_{1-3} + (1 - \varepsilon_{\text{эф}})(\varphi_{1-2} \varphi_{2-3} - \varphi_{1-3} \varphi_{2-2})] / M; \quad (6)$$

$$\Phi_{2-3} = [\varphi_{2-3} + (1 - \varepsilon_{\text{эф}})(\varphi_{2-1} \varphi_{1-3} - \varphi_{2-3} \varphi_{1-1})] / M; \quad (7)$$

$$M = [1 - (1 - \varepsilon_{\text{эф}}) \varphi_{1-1}] [1 - (1 - \varepsilon_{\text{эф}}) \varphi_{2-2}] - (1 - \varepsilon_{\text{эф}})^2 \varphi_{1-2} \varphi_{2-1}. \quad (8)$$





Значения угловых коэффициентов в (6–8) вычисляются при допущении, что пучок состоит из гладких труб диаметром d , равным наружному диаметру ребра.

На основании свойств угловых коэффициентов получены формулы:

$$\varphi_{1-1} = 1 - \varphi_{1-2} - \varphi_{1-3};$$

$$\varphi_{1-2} = 1 - \varphi_{1-3} - \varphi_{a-a} - \frac{\pi}{2\sigma_1} (\varphi_{a-d})^2 (\varphi_{c-d})^{z-2};$$

$$\varphi_{1-3} = \varphi_{a-c} + \varphi_{a-d} (\varphi_{c-d})^{z-1};$$

$$\varphi_{2-1} = \varphi_{1-2} / (z - 1);$$

$$\varphi_{2-2} = 1 - \varphi_{2-1} - \varphi_{2-3};$$

$$\varphi_{2-3} = \frac{2\sigma_1}{\pi(z-1)} \left(1 - (\varphi_{c-d})^z - \varphi_{1-3} \frac{\pi}{2\sigma_1} \right),$$

где вспомогательные угловые коэффициенты

$$\varphi_{a-a} = \frac{2}{\pi} \left(1 + 2\sigma_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1}} - 2\sigma_1 + \arcsin \left(\frac{1}{2\sigma_1 - 1} \right) \right);$$

$$\varphi_{a-c} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{4} + \sigma_1 - \sigma_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1}} - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{1}{2\sigma_1 - 1} \right) \right);$$

$$\varphi_{a-d} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left(2\sigma_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1}} - 2\sqrt{\sigma_1^2 - 1} - 2 \arcsin \left(\frac{1}{\sigma_1} \right) + 2 \arcsin \left(\frac{1}{2\sigma_1 - 1} \right) \right);$$

$$\varphi_{c-d} = \sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1^2}} - \frac{1}{\sigma_1} \arctg \sqrt{\sigma_1^2 - 1}.$$

В формулах для расчета угловых коэффициентов не учтено влияние продольного шага S_2 труб в пучке, так как по [12] это влияние пренебрежимо мало, и угловые коэффициенты от трубного пучка к среде практически всецело зависят от поперечного шага S_1 . На расчет также мало влияет и компоновка труб в пучке — коридорная или шахматная.

11. Вычисляется по известным зависимостям коэффициент тепло-

отдачи α_1 , Вт/(м²·К), от охлаждаемого рабочего тела к внутренней поверхности несущей трубы.

12. Назначается по рекомендациям [13] значение контактного термического сопротивления R_k , (м²·К)/Вт, для БРТ, примененных в рассчитываемом АВО.

13. Рассчитывается коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К), отнесенный к полной площади поверхности оребрения, для БРТ по формуле [13]:

$$k = \left[\varphi \frac{d_0}{d_1} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + R_1 \right) + \varphi \frac{d_0}{d_H} \left(\frac{\delta_a}{\lambda_a} + R_k \right) + \frac{1}{\alpha_2} + R_2 \right]^{-1},$$

где $\delta_{ст}$, δ_a — толщина стенки несущей трубы и алюминиевой оболочки, соответственно, м; $\lambda_{ст}$, λ_a — коэффициент теплопроводности материала несущей трубы и алюминиевой оболочки, соответственно, Вт/(м·К); R_1 , R_2 — термическое сопротивление загрязнений с внутренней стороны несущей трубы и со стороны оребрения, соответственно, (м²·К)/Вт.

14. Площадь поверхности оребрения аппарата, м²:

$$F = \pi d_0 \varphi l m,$$

где l — длина БРТ между трубными решетками теплообменной секции, м; m — число труб в аппарате.

15. Вычисляется по (1) расчетная тепловая нагрузка Q_p аппарата, Вт.

16. Уточняется температура поверхности трубы по основанию ребер со стороны воздуха, °С:

$$t_{ст} = t_0 + Q_p / (\alpha_2 F).$$

Если уточненная температура $t_{ст}$ будет отличаться от принятого ранее значения более чем на 1,5...2 °С, то расчет следует повторить с уточненной температурой стенки.

17. Вычисляется невязка теплового потока, %

$$\delta Q = (|Q_p - Q_6| / Q_6) 100,$$

где Q_6 — тепловой поток, вычисленный по уравнению (2) или (3) теплового баланса.

Если $\delta Q > 1$ %, то необходимо переназначить значение температуры t_0 и повторить расчет. Если $\delta Q \leq 1$ %, то расчет считается окончательным.

Список литературы

1. Назад в будущее // Химическая техника. 2013. № 1. С. 44–47.
2. Камалетдинов И.М. Энергосбережение при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. УГНТУ. Уфа, 2002. 24 с.
3. Шмеркович В.М. Современные конструкции аппаратов воздушного охлаждения / Обзор информ. сер. ХМ-1. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1979. 68 с.
4. Васильев Ю.Н., Марголин Г.А. Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций. М.: Недра, 1977. 222 с.
5. Камалетдинов И.М. Расчет свободноконвективного теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) газа с учетом влияния ветра на их работу // Изв. вузов. Нефть и газ. 2001. № 5. С. 71–74.
6. Самородов А.В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГТУ, 1999. 24 с.
7. Кунтыш В.Б., Самородов А.В., Бессонный А.Н. Экспериментальное исследование свободно-конвективного теплообмена многорядных шахматных пучков из труб со спиральными алюминиевыми ребрами // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 3. С. 3–7.
8. Кунтыш В.Б., Самородов А.В. Исследование влияния угла наклона круглоребристых труб на свободноконвективный теплообмен шахматного пучка в неограниченном объеме воздуха // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83. № 2. С. 338–344.
9. Самородов А.В. К расчету теплообмена излучением круглоребристых труб и пучков // Тр. лесинженерного факультета Петрозаводского гос. ун-та. 1999. Вып. 2. С. 135–142.
10. Пат. РФ 12063, МПК F28 D1/00, G01K 17/00. Способ определения степени черноты материала оребрения в изготовленной теплообменной трубе / В.Б. Кунтыш, В.В. Дударев, А.В. Самородов и др.
11. Самородов А.В., Рошин С.П., Кунтыш В.Б. Лучистый теплообмен одиночной ребристой трубы с окружающей средой // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов. Сб. науч. тр. Архангельск: АГТУ, 1997. Вып. II. С. 102–113.
12. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. М.: Энергоатомиздат, 1974. 247 с.
13. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.

